



**И. В. Шпуров**  
д-р техн. наук  
профессор  
ФБУ «ГКЗ»<sup>1</sup>  
генеральный директор  
ShpurovIV@gkz-ri.ru



**В. Я. Шкловер**  
ООО «СМА»<sup>2</sup>  
директор



**Н. А. Артемов**  
ООО «СМА»<sup>2</sup>  
ведущий геолог



**Т. Г. Дмитриева**  
канд. физ.-мат. наук  
ООО «СМА»<sup>2</sup>  
руководитель сектора  
3D-микроскопии



**Е. Р. Чухланцева**  
ООО «Газпромнефть НТЦ»<sup>3</sup>  
начальник отдела  
Chukhlantseva.ER@gazpromneft-ntc.ru



**В. А. Карпов**  
канд. геол.-мин. наук  
заслуженный геолог РФ  
эксперт ГКЗ  
журнал «Недропользование  
XXI век»<sup>4</sup>  
член редакционной коллегии  
valkarp@yandex.ru

# Трехмерная визуализация внутренней структуры и минерального состава трех основных литотипов баженовской свиты, выделяемых в рамках ВМР

<sup>1</sup>Россия, 119180, Москва, ул. Большая Полянка, 54, стр. 1.

<sup>2</sup>ООО «Системы для микроскопии и анализа». Россия, 121353, Москва, Сколковское ш., 45, офис 20.

<sup>3</sup>Россия, 625048, Тюмень, ул. 50 лет Октября, 14

<sup>4</sup>Россия, 115054, Москва, Большой Строченовский пер., 7, офис 509.

*В статье представлены результаты визуализации объемной структуры, микроморфологии поверхности и минерального состава образцов трех основных литотипов баженовской свиты, выделяемых в рамках «Временного методического руководства по подсчету запасов подвижной нефти трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазосной провинции» (ВМР). По результатам проведенных работ определены различия между основными литотипами пород баженовской свиты с применением современных методов анализа кернового материала, таких как рентгеновская высокоразрешающая микротомография и растровая электронная микроскопия. Продемонстрирована необходимость применения высокоразрешающих методов электронной и рентгеновской микроскопии для анализа кернового материала баженовской свиты. Намечена возможность оперативного корректирования направления поисково-разведочных работ и получения более корректных подсчетных параметров*

**Ключевые слова:** цифровой керн; баженовская свита; рентгеновская микротомография; растровая электронная микроскопия; автоматизированная минералогия; QEMSCAN

С каждым годом в России растет доля месторождений нефти и газа, с запасами, относящимися к трудноизвлекаемым запасам (ТриЗ).

Представляется, что переход к активному освоению ТриЗ УВ сопряжен с необходимостью смены традиционных представлений на генезис природных резервуаров УВ. К примеру, до сих пор нет однозначной модели строения ловушек УВ в баженовской свите. Как известно, традиционный тип природного резервуара УВ обладает свойством сплошности развития как породы, так и флюида в коллекторе, и может быть представлен в виде привычной для всех системы «флюид в породе». [1]

Природный резервуар в баженигах отличается прерывистостью породы и сплошностью флюида в коллекторской его части, образует здесь систему «порода во флюиде» и поэтому обладает инвертным характером.

Стоит отметить что зачастую ответы на наиболее актуальные вопросы отрасли (связанные с вовлечением в разработку все более сложных запасов, например, сложнопостроенных отложений баженовской свиты), находятся за границами разрешающей способности традиционных физических методов исследований, в микронном и субмикронном масштабе.

Так, залежи нефти баженовской свиты Западной Сибири, в которых еще не завершены процессы преобразования органического вещества (керогена) в подвижные углеводороды, имеют геологические ресурсы углеводородов более 100 млрд т. Основная часть углеводородов сосредоточена в коллекторе со средним радиусом пор 8–25 нм. КИН при традиционных походах к характеристике фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) породы составляет первые проценты, что малоэффективно для промышленной разработки [2].

Понятно, что для обнаружения таких скоплений УВ на этих микро и нано масштабах необходимо применение соответствующей методики нефтегазописковых работ, обязательным элементом которой должна быть технология «Цифровой керн».

#### **Технология «Цифровой керн»**

«Цифровой керн» – это совокупность данных об объемной структуре породы, элементном, химическом и минеральном составе компонентов коллектора, пустотном пространстве, органическом веществе, смачиваемости породы на различных масштабах от метров до нанометров, а также результаты компьютерной обработки трехмерной модели внутреннего строения образцов и моделирования физических свойств.

Применение данного решения позволяет увеличить информативность цикла геологоразведочных работ, как на этапе бурения поисковых и разведочных скважин (включая сопровождение бурения по шламу), так и на этапе разработки месторождений (как начальной, так и опережающей).

Совмещение данных о макропористости, макроструктуре и минеральном составе образцов керна позволяет оптимизировать процесс отбора стандартных образцов для лабораторных исследований. Важным аспектом является то, что при снижении общего количества образцов полнота описания целевого разреза скважины не снижается.

Цифровой керн позволяет визуализировать и оценить процессы фильтрации, адгезии и смачиваемости таких коллекторов, что дает уникальную информацию для принятия взвешенного и информированного решения о потенциальной схеме извлечения углеводородного сырья из коллекторов, относящихся к ТриЗ.

Создание трехмерных моделей коллектора и перевод данных о структуре пустотного пространства в «цифровой» вид являются характерным примером *Big Data* и позволяют осуществить плавный переход от привычных данных петрофизических исследований к «Цифровому месторождению».

В будущем на основе предлагаемого решения возможно создание «Цифровых двойников» месторождений для итеративного моделирования извлечения углеводородов, различных воздействий на породу и машинного обучения методов ГИС для создания актуализированных схем интерпретации данных геофизики.

Экономическая выгода от применения «Цифрового моделирования керна» складывается из повышения информативности данных исследования ядерного материала, снижения издержек и оптимизации традиционных исследований и сокращения времени ввода объекта (месторождения) в разработку с оптимальными значениями коэффициента извлечения нефти.

#### **Выделение литотипов баженовской свиты**

Для объединения накопленного опыта, стандартизации подхода к классификации пород и подсчету запасов отложений баженовской свиты авторским коллективом специалистов по поручению ФБУ «ГКЗ» было создано «Временное методическое руководство по подсчету запасов подвижной нефти трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазосной провинции» (ВМР).



классы литотипов	ООО «Сургутнефтегаз» (Барманс II)	ООО «Сургутнефтегаз» (Барманс I)	ИЭГТ СО РАН	ЗАО «МайГФ» им. С.А. Дуретинского	АО «ИЗЦ РАН» В.Ф. Шаломонак	ФГБУ «ЗемСибНИИОГ»	ЗАО «ЛУНГ»
Кремнистые радиолариты, $h_{\text{к}} \approx 100\%$	Глинисто-керогено-кремнистые породы	Радиоларит кремнистый	Силициты	Радиоларит	Силициты слабоглинистые	Силицит	Кремнистые породы
	Глинисто-керогеновые породы			Алорадиоларитовые кремнистые доломиты	Аргиллиты известково-кремнистые и кремнисто-известковые		
Карбонатизированные породы, $h_{\text{к}} \approx 50\%$	Керогено-кремнисто-глинистые породы	Радиоларит кремнисто-карбонатный		Алорадиоларитовые известняки	Силициты глинистые и известково-глинистые		Карбонатные породы
	Глинисто-керогено-карбонатные породы						
	Карбонатные породы		Карбонаты	Известняки трещинно-кавернозные	Известняки, доломиты	Карбонат	Доломитовые породы
Глинисто-битуминозные породы, $h_{\text{б}} \approx 0\%$	Глинистые породы	Тонколистоватые глинисто-кремнистые разности	Микситы	Глинисто-кремнистые сильно битуминозные породы	Аргиллиты кремнистые	Аргиллиты битуминозные	
	Керогено-глинисто-карбонатные породы	Тонколистовато-чешуйчатые глинисто-кремнистые разности			Мергели	Карбонат глинистый	
		Тонколистовато-чешуйчатые глинисто-карбонатно-кремнистые разности				Глины	

Таблица 1.  
Классы литотипов пород баженовской свиты

Основными породообразующими компонентами баженовской свиты являются глинистые, кремнистые, карбонатные минералы и органическое вещество, часто в форме керогена.

Дополнительным породообразующим минералом является пирит. В предложенных разными авторами классификациях выделяется от 3 до 7 литотипов, причем некоторые различаются лишь терминологически, а некоторые принципиально – по подходу к дифференциации разреза. Традиционно литотипы выделяются на основе анализа минерально-геохимического состава породообразующих комплексов. Дифференциация пород на литотипы возможна на основе полученных значений компонентного состава (по керну или ГИС).

Многие эксперты считают, что сланцевые коллекторы с улучшенными ФЕС формировались преимущественно по вторично преобразованным радиоларитам, сложенным известняками и доломитами. К коллекторам в этом случае относятся радиолариты, апорадиоларитовые кремнистые доломиты, апорадиоларитовые известняки и известняки трещинно-кавернозные. Остальные литотипы в этом случае относятся к неколлекторам.

На основе обобщения данных различных групп исследований коллективом авторов была сформирована сводная таблица с основными литотипами баженовской свиты (*табл. 1*).

В *табл. 1* литотипы объединены в три класса по типу «светофора»: красный – неколлекторы, желтый – условные коллекторы, зеленый – коллекторы с хорошими емкостными свойствами и механическими свойствами, увеличивающими их естественную и искусственную трещиноватость [3].

При этом красный класс не формирует  $h_{\text{к}}$ , зеленый – формирует в полном объеме, а желтый – занимает промежуточное положение (~50%).

Для практики работ предлагается выделенные 3 класса условно называть:

- 1 – кремнистые радиолариты (зеленый);
- 2 – карбонатизированные породы (желтый);
- 3 – глинисто-битуминозные породы (красный).

Целью данной работы, проведенной совместно с коллективом специалистов из ООО «Газпромнефть НТЦ», была трехмерная визуализация внутренней структуры и состава выделенных в рамках ВМР литотипов и подготовка

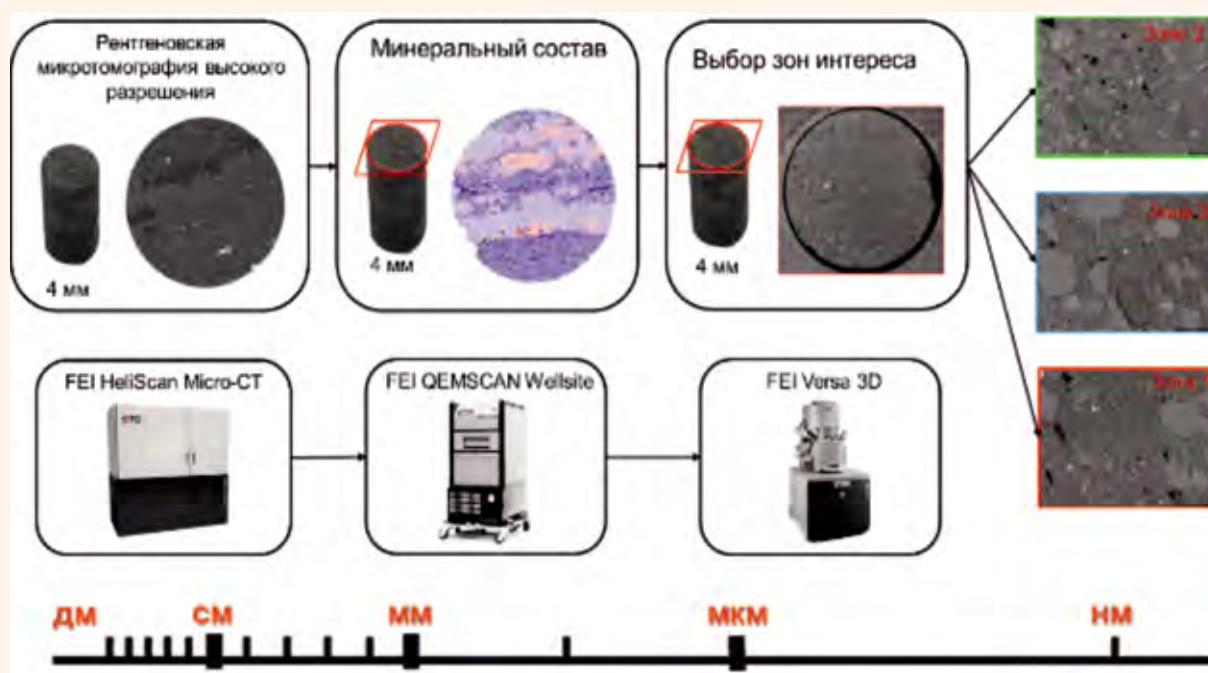


Рис. 2.  
Принципиальная схема проведения работ

прототипа цифрового атласа пород баженовской свиты.

#### Образцы для проведения исследований

Для проведения работ специалистами ООО «Газпромнефть-НТЦ» совместно с рабочей группой ФБУ «ГКЗ» были отобраны 3 образца, представленные:

- кремнистым радиоляритом (Образец 1);
- карбонатизированной породой (Образец 2);
- глинисто-битуминозной породой (Образец 3).

Предварительная типизация образцов основывалась на данных петрографического описания шлифов и общего рентгеноструктурного анализа (PCA).

#### Принципиальная схема проведения исследований

Для проведения исследований была использована мультимасштабная схема работ, представленная на рис. 2.

Основной целью применения мультимасштабной схемы исследований является сохранение зоны интереса при переходе от масштаба к масштабу, что позволяет в дальнейшем привязать друг к другу разномасштабные исследования структуры и свойств образцов, выполненные различными методами электронной микроскопии и рентгеновской микротомографии.

Комплекс запланированных исследований включал в себя:

- изготовление цилиндрических микрообразцов керна диаметром 4 мм для проведения рентгеновской микротомографии высокого разрешения;
- проведение рентгеновской микротомографии высокого разрешения для визуализации и оценки неоднородности внутреннего строения образцов;
- проведение минералогического картирования поверхности образцов методом автоматизированной минералогии QEMSCAN;
- выбор зон интереса и визуализация микроструктурных особенностей строения образцов методом растровой электронной микроскопии.

#### Кремнистый радиолярит

По результатам реконструкции данных рентгеновской микротомографии образца кремнистого радиолярита можно отметить следующие особенности внутреннего строения:

- большое количество (до 20%) включений останков радиолярий, большая часть которых сильно пиритизированна;
- наличие равномерной трещиноватой кремнистой матрицы с изолированными порами (до 1%).

Результаты рентгеновской микротомографии образца кремнистого радиолярита приведены на рис. 3.

Пористость образца, определенная по результатам рентгеновской микротомографии, со-

ставляет 0,9% (визуализированы и проанализированы объекты размером более 4 микрон).

По данным автоматизированного определения минерального состава QEMSCAN минеральный (фазовый) состав образца кремнистого радиолярита представлен кварцевой матрицей (кремнеземом) на 68,6%, включениями пирита на 17,8%, представленными сильно пиритизированными обломками радиолярий, органическим веществом на 3,9% и отдельными зернами и включениями кальцита, полевых шпатов и глинистых минералов.

Образец текстурирован, наблюдается слоистая текстура по напластованию породы.

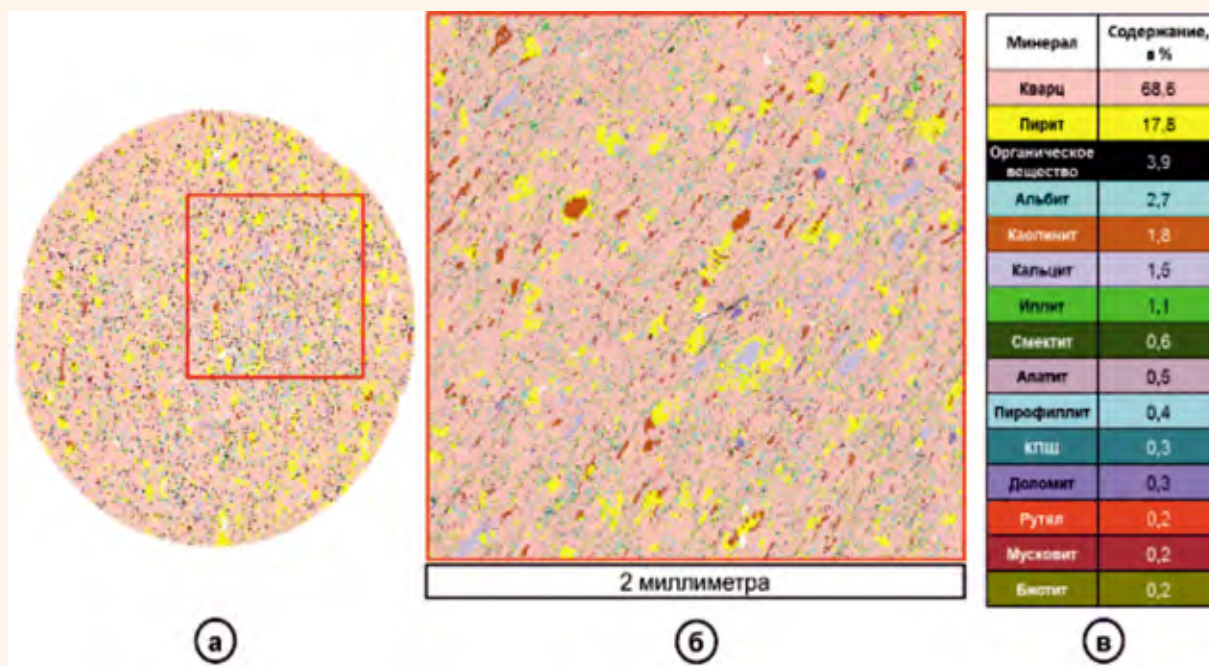
Результаты минералогического анализа поверхности образца кремнистого радиолярита приведены на **рис. 4**.

При визуализации поверхности образца методом растровой электронной микроскопии стоит отметить следующие особенности строения:

- сильную пиритизацию остатков радиолярий;
- частичное заполнение пустотного внутриформенного пустотного пространства в радиоляриях глинистыми минералами, в частности каолинитом;
- отдельные линзовидные включения плотного органического вещества, ассоциированные с остатками радиолярий;

**Рис. 4.**

Результаты построения карты минерального состава поверхности образца кремнистого радиолярита: а – карта поверхности всего 4 мм образца с указанием зоны интереса, б – карта минерального состава зоны интереса, в – цветовая легенда и весовые концентрации основных породообразующих минералов



**Рис. 3.**

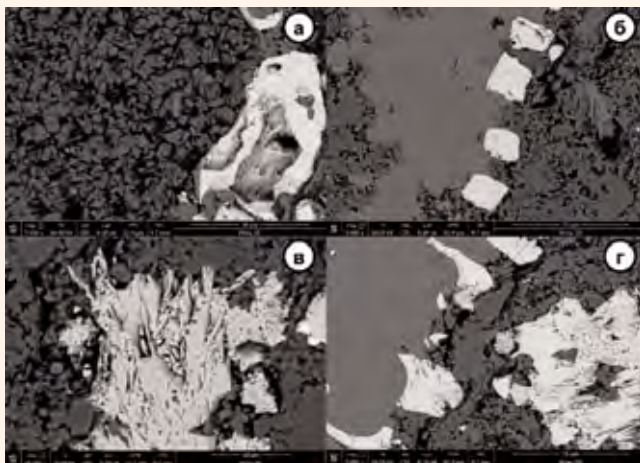
Результаты рентгеновской микротомографии образца кремнистого радиолярита: а – трехмерная модель внутреннего строения образца, б – сечение образца по оси XZ, в – трехмерная модель пустотного пространства образца

– плотную кремнистую матрицу и единичные, изолированные поры.

Результаты визуализации различных зон на поверхности образца кремнистого радиолярита приведены на **рис. 5**.

Проведенный энергодисперсионный анализ основных фаз на поверхности образца подтвердил данные автоматизированного анализа минерального состава QEMSCAN, среди основных фаз прослеживаются кварц (кремнезем), пирит (в форме псевдоморфозов по остаткам радиолярий, фрамбоидальной и кристаллической формами выделения), кальцит, каолинит с характерной структурой кристаллов и органи-





**Рис. 5.**  
ЭМ-изображения поверхности образца кремнистого радиоларита: а – каолинит в радиоларии, б – пиритизированные остатки радиоларий, в – кристаллы пирита, г – кальцит в радиоларии

ческое вещество в виде отдельных линзовидных включений.

Результаты визуализации поверхности и точечного энергодисперсионного анализа выбранной зоны интереса приведены на **рис. 6**.

**Рис. 6.**  
ЭМ-изображения поверхности образца кремнистого радиоларита с отмеченными точками проведения энергодисперсионного анализа и содержанием элементов в данных точках: 1 – каолинит, 2 – пирит, 3 – органическое вещество, 4 – пирит, 5 – кварц (кремнезем)



### Карбонатизированная порода

По результатам реконструкции данных рентгеновской микротомографии образца карбонатизированной породы можно отметить следующие особенности внутреннего строения:

- сильную неоднородность внутреннего строения образца, включая участки различной плотности, расположенные по напластованию образца;
- приуроченность пустотного пространства образца к трещинам и основной доломитовой матрице;
- наличие высокоплотных включений во всем объеме образца;
- присутствие в образце 4 различных фаз.

Результаты рентгеновской микротомографии образца карбонатизированной породы приведены на **рис. 7**.

Пористость образца, определенная по результатам рентгеновской микротомографии составляет 2,1% (визуализированы и проанализированы объекты размером более 4 микрон).

По данным автоматизированного определения минерального состава QEMSCAN минеральный (фазовый) состав образца карбонатизированной породы представлен доломитовой матрицей на 37,6%, кальцитом на 38%, представленным прослоями размером от 1 до 1,5 мм, кварцем на 14,4%, представленным участками вторично замещенного кальцита и отдельными зернами, и включениями кальцита, полевых шпатов и глинистых минералов.

Результаты минералогического анализа поверхности образца кремнистого радиолярита приведены на **рис. 8**.

При визуализации поверхности образца методом растровой электронной микроскопии стоит отметить следующие особенности строения:

- приуроченность органического вещества в образце к включениям глинистых минералов, в частности иллита и каолинита;
- частичное замещение кальцита на кварц;
- микротрещиноватость, приуроченную к границам переслаивания доломитовой матрицы и слоев кальцита.

Результаты визуализации различных зон на поверхности образца карбонатизированной породы приведены на **рис. 9**.

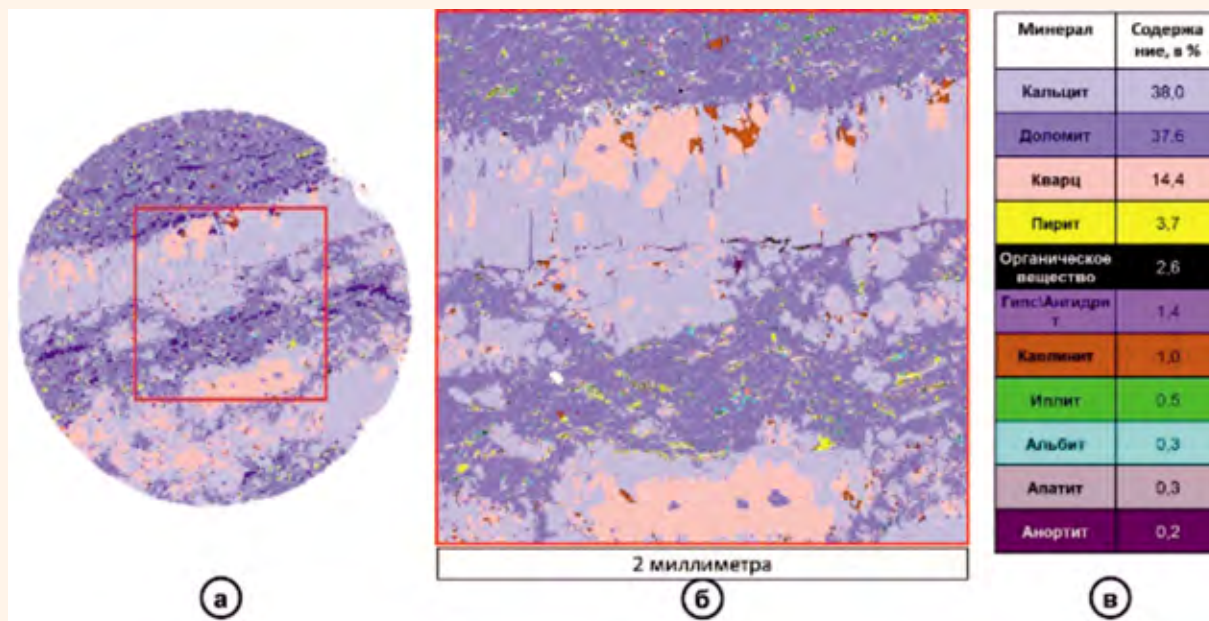
Проведенный энергодисперсионный анализ основных фаз на поверхности образца подтвердил данные автоматизированного анализа минерального состава *QEMSCAN*, среди основных фаз прослеживаются доломит, пирит (в кристаллической и фрамбоидальной форме выделения), кальцит, каолинит с характерной структурой кристаллов и органическое вещество в виде пленок, приуроченных к глинистым минералам.

Отдельно стоит отметить межзерновые поры и микротрещиноватые участки на границе раздела фаз доломита и кальцита.

Результаты визуализации поверхности и точечного энергодисперсионного анализа выбранной зоны интереса приведены на **рис. 10**.

**Рис. 8.**

Результаты построения карты минерального состава поверхности образца кремнистого радиолярита: а – карта поверхности всего 4 мм образца с указанием зоны интереса, б – карта минерального состава зоны интереса, в – цветовая легенда и весовые концентрации основных пороодообразующих минералов



**Рис. 7.**

Результаты рентгеновской микротомографии образца карбонатизированной породы: а – трехмерная модель внутреннего строения образца, б – сечение образца по оси XZ, в – трехмерная модель пустотного пространства образца

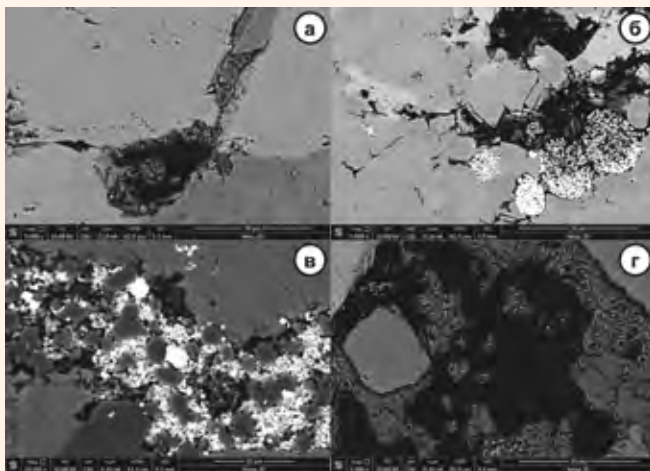
### Глинисто-битуминозная порода

По результатам реконструкции данных рентгеновской микротомографии образца глинисто-битуминозной породы можно отметить следующие особенности внутреннего строения:

- большое количество (до 30%) высокоплотных включений, расположенных по напластованию образца;
- отсутствие развитого пустотного пространства в образце;
- четкая текстурная слоистость образца;
- наличие прослоев и линз, представленных очень легкой фазой (органическим веществом).

Результаты рентгеновской микротомографии образца глинисто-битуминозной породы приведены на **рис. 11**.





**Рис. 9.**  
ЭМ-изображения поверхности образца карбонатизированной породы: а – микротрещины в кальците, б – пленки органического вещества на фрамбоидах пирита, в – пиритизированная трещина, г – органическое вещество и глинистые минералы в поре

Пористость образца, определенная по результатам рентгеновской микротомографии, составляет 0,2% (визуализированы и проанализированы объекты размером более 4 микрон).

По данным автоматизированного определения минерального состава QEMSCAN минеральный (фазовый) состав образца глинисто-

битуминозной породы представлен пиритом на 28,3%, представленным фрамбоидальными кристаллами, по всей поверхности образца, кварцем на 17,8%, иллитом на 13,7%, органическим веществом на 12,2%, представленным включениями, линзами и прослоями размером от 0,01 до 0,1 мм, кальцитом на 6,3% и включениями полевых шпатов, слюд и аксессуарных минералов.

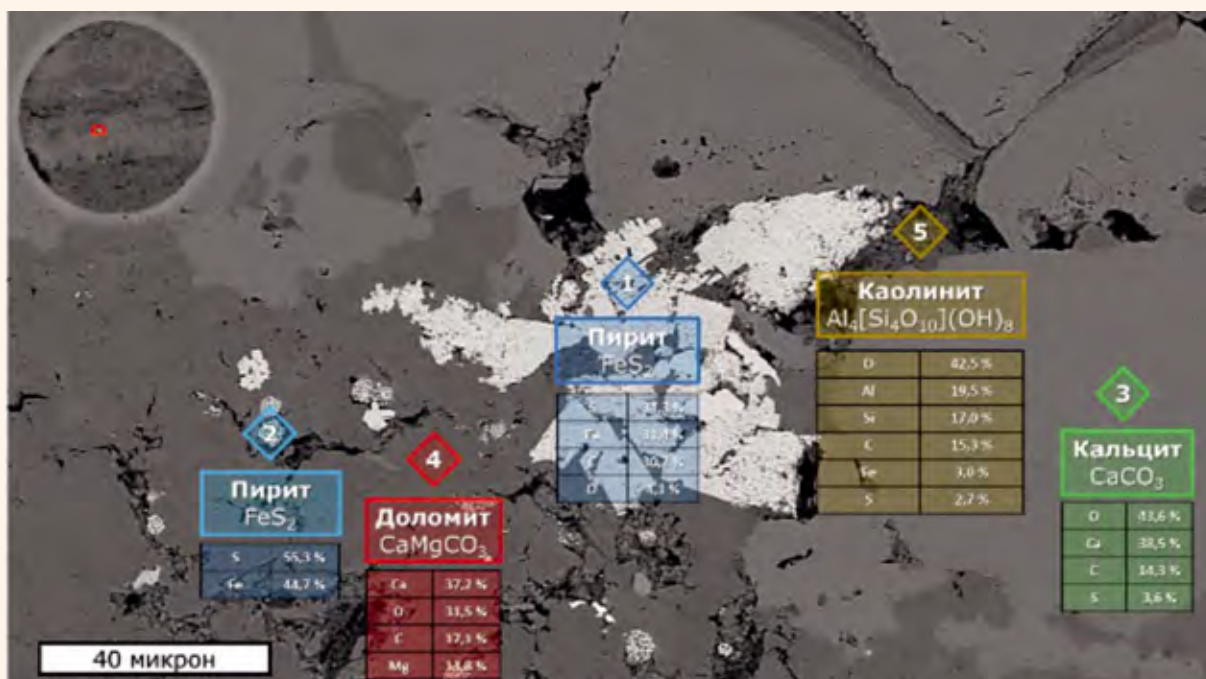
Результаты минералогического анализа поверхности образца кремнистого радиолярита приведены на **рис. 12**.

При визуализации поверхности образца методом растровой электронной микроскопии стоит отметить следующие особенности строения:

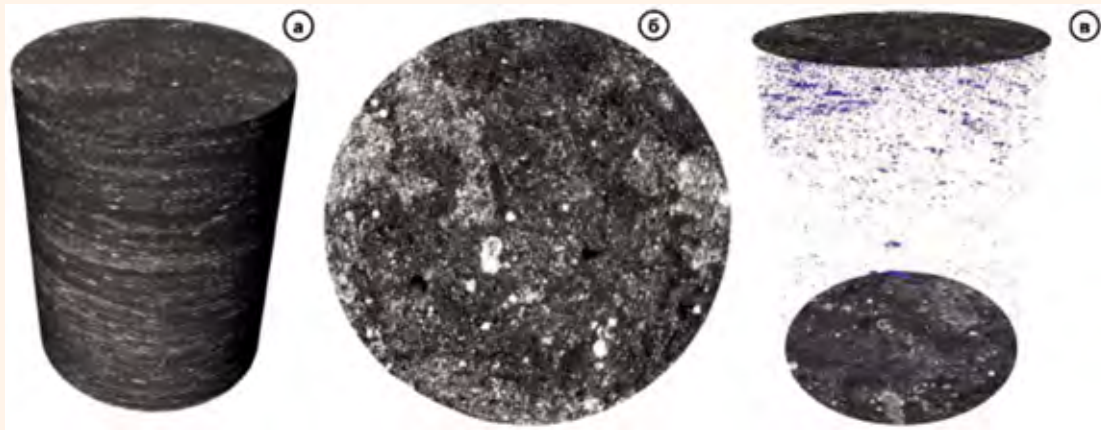
- ассоциированность органического вещества в образце с обломками и остатками радиолярий;
- повсеместное присутствие фрамбоидов пирита, равномерно распределенных по поверхности образца;
- наличие отдельных зерен альбита и рутила;
- преобладание среди глинистых минералов иллита, формирующего наряду с кварцем и пиритом основную матрицу образца.

Результаты визуализации различных зон на поверхности образца глинисто-битуминозной породы приведены на **рис. 13**.

**Рис. 10.**  
ЭМ-изображения поверхности образца карбонатизированной породы с отмеченными точками проведения энергодисперсионного анализа и содержанием элементов в данных точках: 1 – пирит, 2 – пирит, 3 – кальцит, 4 – доломит, 5 – каолинит







**Рис. 11.**

Результаты рентгеновской микротомографии образца глинисто-битуминозной породы: а – трехмерная модель внутреннего строения образца, б – сечение образца по оси XZ, в – трехмерная модель пустотного пространства образца

Проведенный энергодисперсионный анализ основных фаз на поверхности образца подтвердил данные автоматизированного анализа минерального состава QEMSCAN, среди основных фаз прослеживаются доломит, пирит (в кристаллической и фрамбоидальной форме выделения), кальцит и органическое вещество в виде линз и прослоев.

Результаты визуализации поверхности и точечного энергодисперсионного анализа выбранной зоны интереса приведены на **рис. 14**.

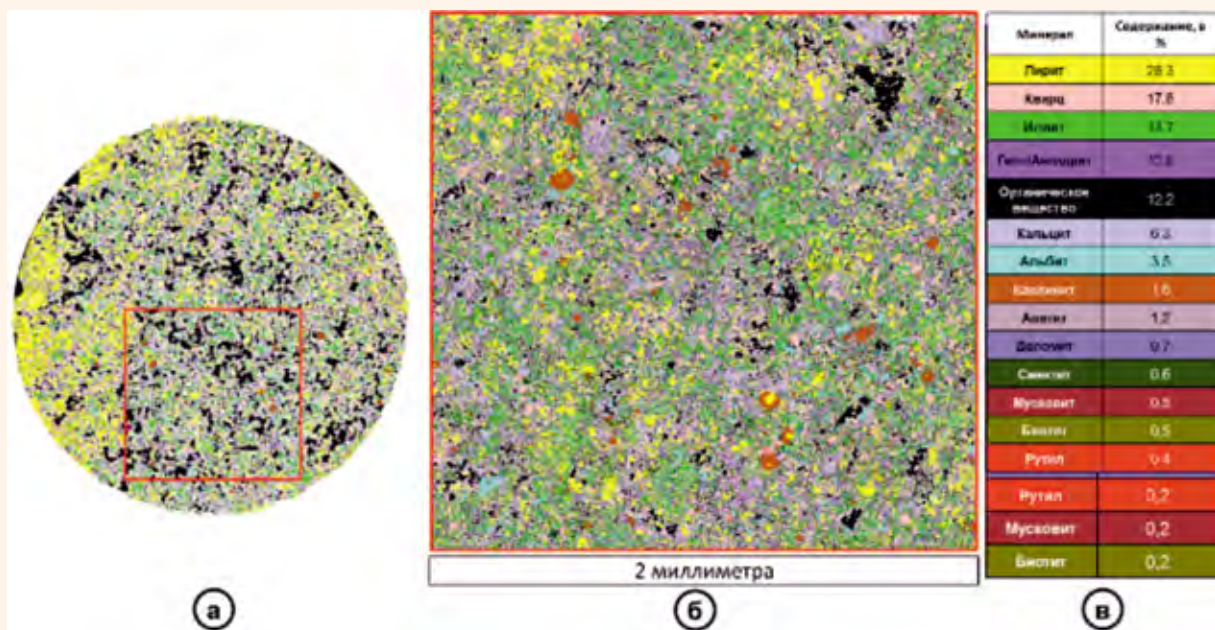
### Выводы

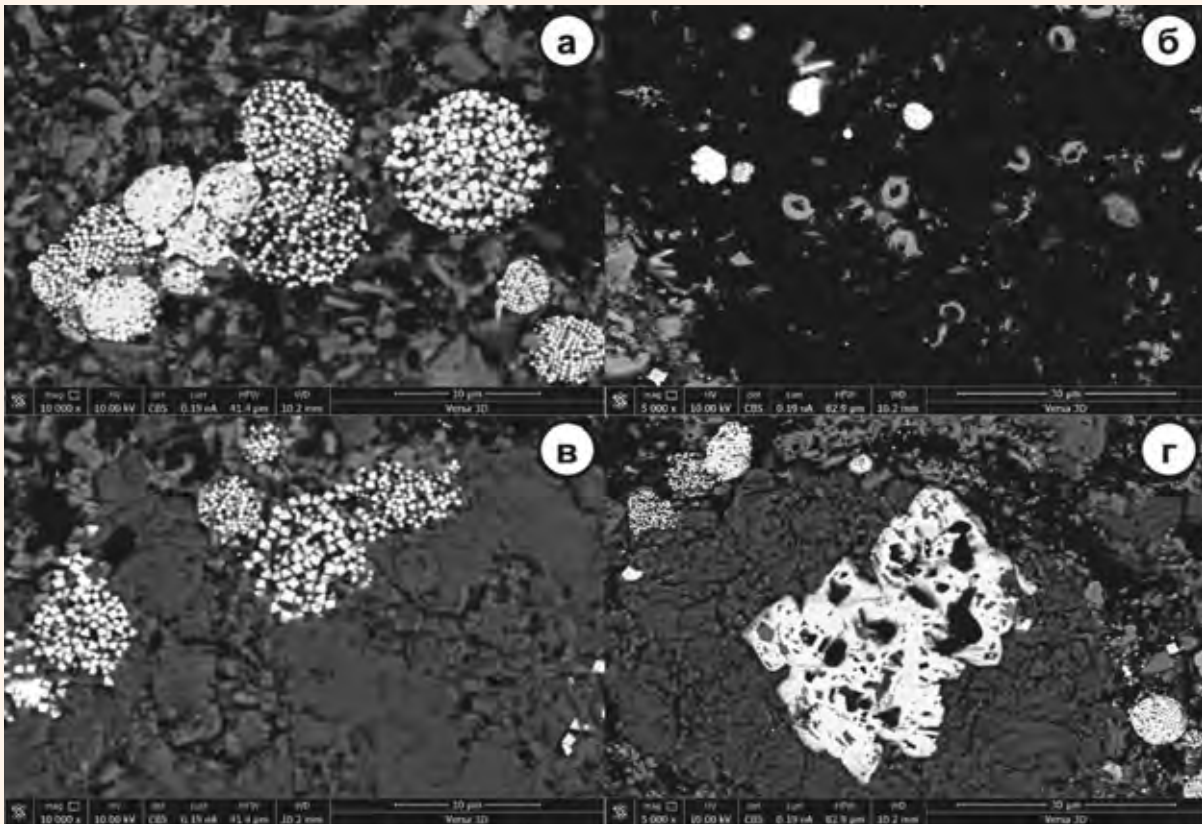
По результатам проведенной работы визуализированы три основных литотипа баженовской свиты, выделяемых в рамках «Временного методического руководства по подсчету запасов подвижной нефти трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазосной провинции».

С применением методов мультимасштабной электронной и рентгеновской микроскопии

**Рис. 12.**

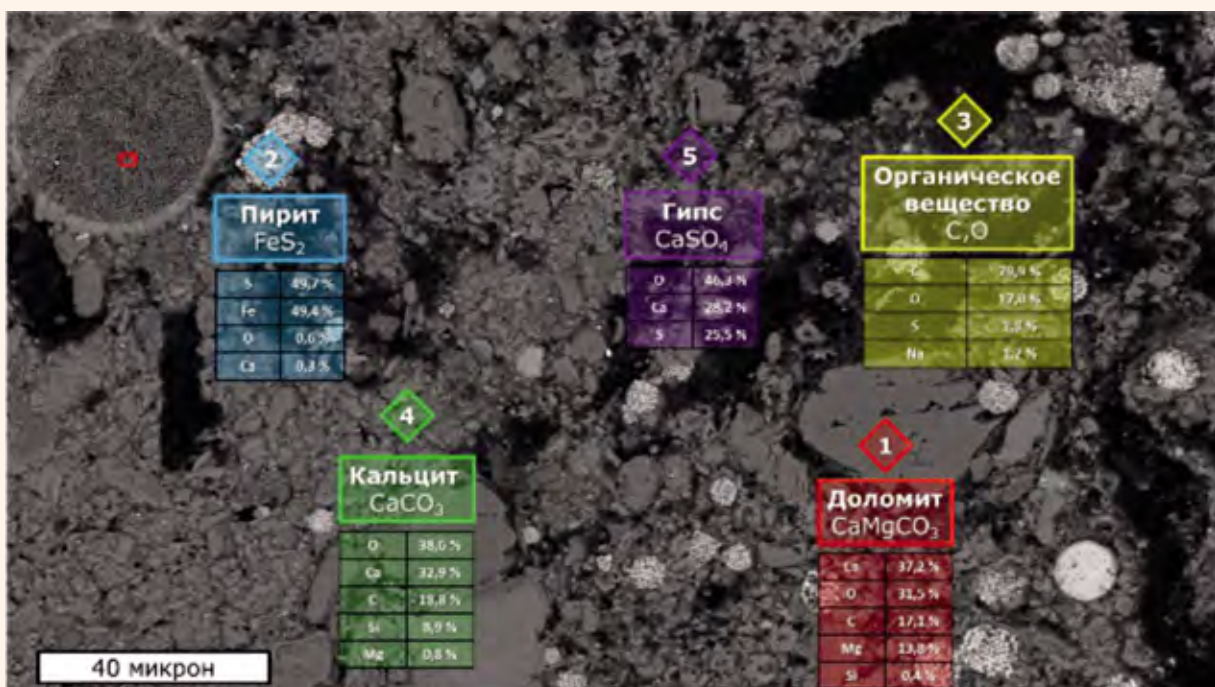
Результаты построения карты минерального состава поверхности образца глинисто-битуминозной породы: а – карта поверхности всего 4 мм образца с указанием зоны интереса, б – карта минерального состава зоны интереса, в – цветовая легенда и весовые концентрации основных породообразующих минералов



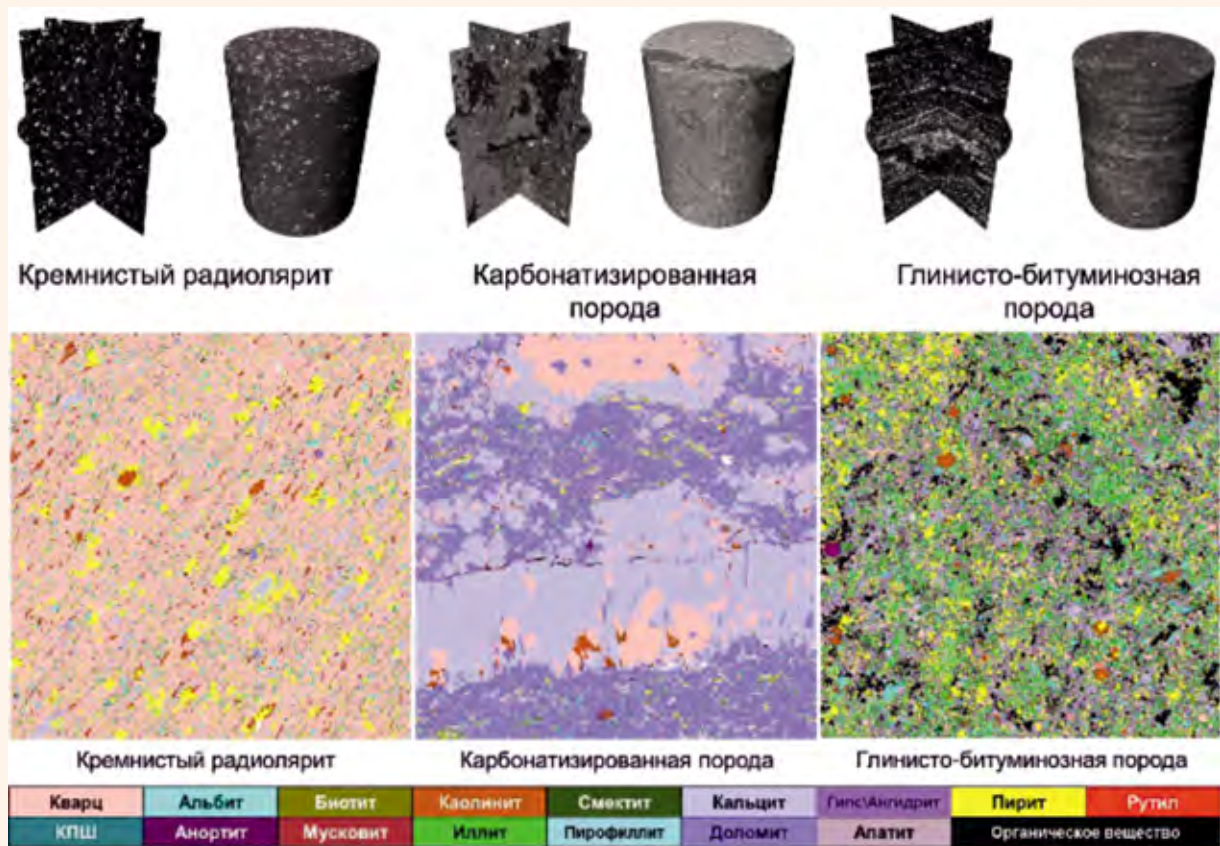


**Рис. 13.** ЭМ-изображения поверхности образца глинисто-битуминозной породы: а, в – выделения фрамбоидального пирита, б – обломки радиолярий в органическом веществе, г – включения кристаллического пирита

**Рис. 14.** ЭМ-изображения поверхности образца глинисто-битуминозной породы с отмеченными точками проведения энергодисперсионного анализа и содержанием элементов в данных точках: 1 – доломит, 2 – пирит, 3 – ОВ, 4 – доломит, 5 – каолинит.







**Рис. 15.** Принципиальные различия во внутренней структуре и минеральном составе трех литотипов баженовской свиты

продемонстрированы различия во внутренней структуре, пустотном пространстве, минеральном составе и микроструктурные особенности строения трех основных литотипов баженовской свиты.

Отмечены характерные особенности состава и строения каждого литотипа, что позволяет проводить четкую дифференциацию пород баженовской свиты.

На **рис. 15** и **16** представлены сводные данные о различиях во внутренней структуре, минеральном составе и микроструктуре трех литотипов баженовской свиты.

Основными отличительными особенностями исследованных образцов являются:

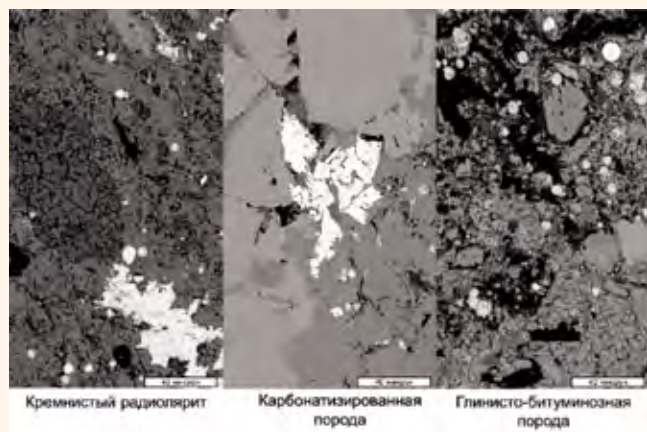
- **для образца кремнистого радиолярита**
  - наличие кремнистой матрицы и большого количества обломков и останков радиолярий, зачастую сильно пиритизированных;
  - наличие изолированной пористости;
  - присутствие в образце изолированных включений органического вещества.
- **для образца карбонатизированной породы**
  - частичная окремнение кальцитовых прослоев;

- межзерновая пористость, приуроченная к границам кальцита и доломитовой матрицы;
- наличие органического вещества в виде пленок на поверхности.

- **для образца глинисто-битуминозной породы**

- высокое содержание органического вещества в виде прослоев и включений;

**Рис. 16.** Принципиальные различия в микроструктуре трех литотипов баженовской свиты



Минерал	Литотипы пород баженовской свиты		
	Кремнистый радиолярит	Карбонатизированная порода	Глинисто-битуминозная порода
Содержание в вес. %			
Кварц (кремнезем)	68,6	14,4	17,8
Альбит	2,7	0,3	6,5
Анортит		0,2	
КПШ	0,3		
Каолинит	1,8	1,0	1,6
Смектит	0,6		0,6
Иллит	1,1	0,5	13,7
Пирофиллит	0,4		
Мусковит	0,2		0,5
Биотит	0,2		0,5
Кальцит	1,5	38,0	6,3
Доломит	0,3	37,6	0,7
Гипс/Ангидрит		1,4	12,8
Апатит	0,5	0,3	1,2
Пирит	17,8	3,7	28,3
Рутил	0,2		0,4
Органическое вещество	3,9	2,5	12,2

Таблица 2.

Сводная таблица минерального состава различных литотипов баженовской свиты по данным автоматизированного анализа минерального состава QEMSCAN.

- высокое содержание фрамбоидального пирита, равномерно рассеянного по объему породы;
- ассоциированность органического вещества с обломками и останками радиолярий;
- высокое содержание глинистых минералов.

Отдельно стоит отметить и существенные различия в минеральном составе трех различных литотипов (табл. 2), которые могут быть использованы как одни из надежных критериев поиска перспективных объектов и типизации разреза.

Отмеченная дифференциация пород баженовской свиты находит отражение в результатах поисково-разведочных работ.

Общая картина выглядит следующим образом.

На участках развития кремнистого радиолярита были получены притоки нефти с максимальными дебитами, приуроченными к инвертным коллекторам, к «сладким пятнам». Здесь при испытании скважин зафиксированы фонтаны нефти без проведения ГРП. Были здесь случаи и нерегулируемых фонтанов нефти.

На участках развития карбонатизированной породы чаще всего промышленные притоки нефти получены только после проведения ГРП, причем имело место кратное увеличение дебита в результате его проведения.

На участках развития глинисто-битуминозной породы, как правило, ГРП не имеет никакого эффекта: промышленных притоков нефти здесь не получено.

При этом зоны развития первого типа пород тяготеют, как правило, к активным разломам, к узлам их пересечения. Как наиболее хрупкие разности пород, они содержат лучшие коллекторы с максимальным проявлением трещиноватости. Зоны второго типа породы, оконтуривая породы первого типа, находятся на некотором удалении от активных разломов и их узлов пересечения. И далее, вне влияния активных разломов, развиты породы третьего типа, обладающие минимальными перспективами нефтегазоносности.

Зачастую проведение многостадийного гидроразрыва пласта (МГРП) позволяет добыть высококого дебита скважины, но с баженом не все так просто. Согласно принятой геологичес-



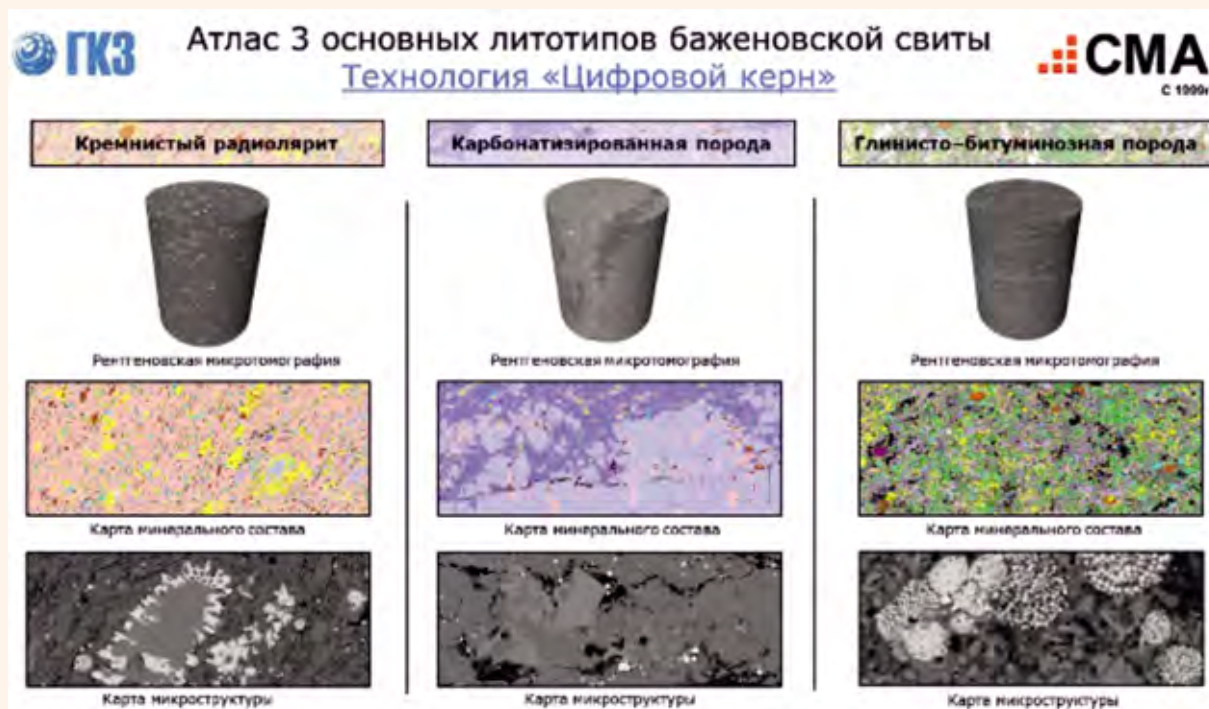


Рис. 17.  
Рабочий интерфейс прототипа цифрового атласа пород баженовской свиты

кой модели, потенциально продуктивные интервалы (ППИ) на бажене развиты в виде отдельных пропластков. Чтобы условия для проведения МГРП были оптимальными и образовавшиеся в результате трещины охватили максимальную часть пласта, необходимо не промахнуться во время проводки скважины. Ошибки здесь приведут к бесполезности дорогостоящего ГРП. Решением этой проблемы должна стать разработка технологии мониторинга в режиме реального времени геомеханических свойств пород и управления режимами бурения в зависимости от их изменения. Соответствующий комплекс мониторинга скважин *LWD (logging while drilling)* существует и успешно применяется лидерами отрасли. Сегодня специалисты нефтегазовых компаний совместно с сервисными компаниями работают над его адаптацией к условиям баженовской свиты [4].

Таким образом, намечается возможность корректировки направления поисково-разведочных работ по результатам оперативного применения технологии «Цифровой керн» непосредственно в процессе этих работ, в частности сопровождения бурения горизонтальных участков скважин в баженовской свите по шламу.

Дальнейшая характеристика образцов баженовской свиты требует применения мультимасштабных методов электронной и рентгеновской микроскопии в виду характерных микронных и субмикронных размеров объек-

тов интереса (пор, включений органического вещества и т.д.)

Представленный подход позволяет визуализировать и оценить различия в структуре и составе основных литотипов баженовской свиты, выделяемых в рамках «Временного методического руководства по подсчету запасов подвижной нефти трещинных и трещинно-поровых коллекторов в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции».

Этот подход (при увязке его результатов с данными ГИС) позволит более надежно определять один из главных (и пока спорный) подсчетных параметров – эффективную нефтенасыщенную толщину, а вслед за ним и площадь развития нефтенасыщенных пород-коллекторов, не подчиненную структурному плану баженовской свиты.


По результатам проведенных работ был создан прототип цифрового атласа образцов баженовской свиты, позволяющий проводить визуализацию и сравнение различий в структуре, составе и свойствах основных литотипов в отложениях баженовской толщи.

Интерфейс прототипа цифрового атласа приведен на **рис. 17**.

Для получения исходной информации на этапе планирования разработки и методов увеличения нефтеотдачи предлагается дополнить вышеописанный комплекс работ данными о смачиваемости, механической хрупкости и ад-

гезии органического вещества к матрице породы, полученными в рамках технологии «Цифровой керн».

Технология «Цифровой керн» способна также дать исходные данные для корректировки методики проведения ГРП. Есть сравнительные результаты применения ГРП на углеводородной и водной основе. Они не в пользу последнего.

В конечном счете применение технологии «Цифровой керн» способно уточнить генезис природного резервуара не только баженинов, но и домаников, хадумитов и других разновидностей сланцевых образований, оптимизировать методику локализации, оконтуривания и режимы эксплуатации нефтяных залежей, приуроченных к ним. 

## Литература

1. Шкловер В.Я., Артемов Н.А., Маряев И.Г., Дмитриева Т.Г., Рашковский А.Ю., Карпов В.А. Технология анализа и цифрового моделирования керна как составляющая часть инфраструктуры «цифрового месторождения». От геологоразведки до промышленной эксплуатации // Недропользование XXI век. 2018. № 5. С. 84–98.
2. Хавкин А.Я. Наноявления в нефтегазодобыче // Вестник РАН. 2009. Т.79. № 6. С. 519–522.
3. Временное методическое руководство по подсчету запасов подвижной нефти трещинных и трещинно-порowych коллекторах в отложениях баженовской толщи Западно-Сибирской нефтегазосной провинции // Недропользование XXI век. 2017. № 4.
4. Газпромнефть – баженовские вызовы // Сибирская нефть. 2015. № 121.

UDC 553.98

**I.V. Shpurov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director General of State Commission on Mineral Reserves<sup>1</sup>, ShpurovIV@gkz-rf.ru.  
**V.Ya. Shklover**, Director of OOO “Systems for Microscopy and Analysis”<sup>2</sup>  
**N.A. Artemov**, Leading Geologist of OOO “Systems for Microscopy and Analysis”<sup>2</sup>  
**T.G. Dmitrieva**, PhD, Head of 3D Microscopy Sector of OOO “Systems for Microscopy and Analysis”<sup>2</sup>  
**E.R. Chukhlantseva**, Head of Department LTD «Gazpromneft–NTC»<sup>3</sup>, Chukhlantseva.ER@gazpromneft-ntc.ru  
**V.A. Karpov**, PhD, Expert State Commission on Mineral Reserves, Member of the Editorial Board of “Subsoil use XXI Century” magazine<sup>4</sup>, valkarp@yandex.ru.

<sup>1</sup>54, bldg 1, Bolshaya Polyanka str., Moscow, 119180, Russia.

<sup>2</sup>Office 20, 45 Skolkovskoe shosse, Moscow, 121353, Russia.

<sup>3</sup>14 50 Let Oktyabrya street, Tyumen, 625048, Russia.

<sup>4</sup>Office 509, 7 Bolshoy Strovchenovskiy side street, Moscow, 115054, Russia.

## 3D visualization of internal structure and mineral composition of three major Bazhenov lithotypes identified within the framework of the Provisional Guidance for Oil Reserves Assessment in the Bazhenov Fractured and Fractured-Porous Reservoirs of the West Siberian Petroleum Province

**Abstract.** The paper presents the results of 3D structure, surface micromorphology, and mineral composition visualization of the samples of three major Bazhenov lithotypes identified within the framework of the Provisional Guidance for Oil Reserves Assessment in the Bazhenov Fractured and Fractured-Porous Reservoirs of the West Siberian Petroleum Province. On the results of the work, differences between the major Bazhenov lithotypes are identified with the use of modern methods of core analysis, such as X-ray high-resolution microtomography and scanning electron microscopy. The need to use the high-resolution methods of electron and X-ray microscopy for analysis of core material taken from the Bazhenov Fm is demonstrated. The possibility of operative correction of the focus of prospecting and exploration works and obtaining more correct variables used to estimate reserves is planned.

**Keywords:** digital core; Bazhenov Fm; X-ray microtomography; scanning electron microscopy; automated mineralogy; QEMSCAN

## References

1. Shklover V.Ya., Artemov N.A., Maryaev I.G., Dmitriyeva T.G., Rashkovskiy A.YU., Karpov V.A. *Tekhnologiya analiza i tsifrovogo modelirovaniya kerna kak sostavlyayushchaya chast' infrastruktury «tsifrovogo mestorozhdeniya»*. Ot geologorazvedki do promyshlennoy ekspluatatsii [Technology analysis and digital core modeling as part of the infrastructure of the “digital field”. From geological exploration to industrial exploitation]. *Nedropol'zovaniye XXI vek* [Subsoil Use XXI Century], 2018, no. 5, pp. 84–98.
2. Khavkin A.Ya. *Nanoyavleniya v neftegazodobyche* [Nanotechnologies in oil and gas production]. *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2009, vol. 79, no. 6, pp. 519–522.
3. *Vremennoye metodicheskoye rukovodstvo po podschetu zapasov podvizhnoy nefti treshchinnykh i treshchinno-porovykh kollektorakh v otlozheniyakh bazhenovskoy tolshchi Zapadno-Sibirskoy nefteganosnoy provintsii* [Provisional methodological guidelines for the calculation of reserves of mobile oil in fissure and fractured porous reservoirs in sediments of the Bazhenov stratum of the West Siberian oil and gas bearing province]. *Nedropol'zovaniye XXI vek* [Subsoil Use XXI century], 2017, no. 4.
4. *Gazpromneft' – bazhenovskiy vyzov* [Gazpromneft - Bazhenov Challenges]. *Sibirskaya neft'* [Siberian Oil], 2015, no. 121.